第46卷　第3期
2023年3月

干旱区地理
ARID　LAND　GEOGRAPHY

Vol. 46　No. 3
Mar. 2023

新疆水资源与农业种植系统耦合协调及时空差异研究
——以粮食和棉花种植系统为例

张　宁[1]，　汪子晨[1]，　杨　肖[1]，　陈　彤[2]，　邢　飞[1]

（1. 杭州电子科技大学管理学院，浙江 杭州　310018；2. 新疆农业科学院，新疆 乌鲁木齐　830052）

摘　要：为研究新疆水资源状况与农业种植发展的耦合协调性及时空差异性，以新疆粮食和棉花种植系统为例并基于2005—2019年14个地州的水资源、农业种植相关数据，运用熵值法、耦合协调度模型和探索性空间数据分析对水资源系统、农业种植系统的综合发展指数及水资源-农业种植复合系统（简称"复合系统"）的耦合协调度与时空演化规律进行测算研究。结果表明：(1) 新疆复合系统综合发展指数在空间上表现出"中轴高，两翼低"的特征，其中水资源系统整体水平较高，农业种植系统增长趋势更快。(2) 新疆复合系统耦合协调水平总体呈现出"北高南低，但差距逐渐缩小"的发展趋势，并且因区域差异致使农业种植系统逐渐成为阻碍复合系统耦合协调发展的短板。(3) 新疆复合系统的耦合协调度存在显著的空间集聚特征，但其正相关性则表现出由强减弱的变化态势。研究结果对新疆水资源可持续利用与农业种植系统产业的良性协调发展具有理论实践意义。

关 键 词：水资源-农业种植复合系统；耦合协调度；探索性空间数据分析；时空差异；新疆

文章编号：1000－6060(2023)03－0349－11(0349～0359)

新疆是我国农业种植的主要后备资源区，其粮食、棉花等优势农业产业的种植面积、总产、单产呈现"三增"的利好局势，为我国实现农业种植自给自足、安全生产以稳固经济发展提供基础保障。水资源作为支撑农业产业的基础要素，其利用结构和管理方式会随着农作物种植结构与面积的变化不断转变[1]，然而受地域与气候条件的限制，新疆存在水资源短缺且空间分布不均等问题，农业种植产业发展极易受到制约。为此，探讨新疆水资源、农业种植系统的发展水平，并研究水资源-农业种植复合系统（简称"复合系统"）的耦合协调性及其时空差异，对理解干旱地区水资源及农业种植系统耦合协调发展的变化趋势及内在机理，促进干旱地区农业经济增长具有重要理论与现实意义。

水资源的供需量及利用效率与农业种植结构及现代化程度密切相关，不同农作物种植的生长周期及条件差异致使其对水资源的需求呈现出不同的周期特点，尤其在干旱地区保持水资源可持续利用与农作物种植效益间平衡，对农业生产生活的稳定至关重要。针对农作物种植差异，郎婷婷等[2]对干旱区域不同农作物在生长周期内的耗水量进行了模拟；金涛[3]研究了粮食作物种植结构调整对水资源消耗的影响；张家欣等[4]对中国西北地区棉花等作物生产水足迹占比进行了推算，并据此对区域经济作物的用水调控政策提出了建议。对于水资源有效利用与农业种植关系方面，吴勇等[5]指出农业用水效率是保障粮食安全的切实基础；方芳等[6]基于虚拟水视角探讨了农作物种植布局改变后水资源利用价值的变化；许航等[7]提出干旱地区节水灌溉技术利用过程中，应避免因种植产业规模扩大

收稿日期：2022-06-25；　**修订日期：**2022-10-27

基金项目：国家社科基金项目（20BGL188）；国家自然科学基金重点项目（71933005）；浙江省高校重大人文社科攻关计划项目（2023GH003）资助

作者简介：张宁（1974-），女，博士，教授，主要从事水资源管理研究. E-mail: zhedazhangning@126.com

通讯作者：汪子晨（1996-），男，硕士研究生，主要从事水资源管理研究. E-mail: 201030040@hdu.edu.cn

而影响水资源可持续利用；孙才志等[8]指出农业信息化技术建设对粮食和棉花的水足迹强度降低具有重要的促进作用；杨晶[9]提出构建乡村振兴背景下农业水资源的节水激励机制应从种植业结构视角出发。综上所述，现有对水资源与单个农作物种植产业间相互关系的研究较为丰富，但鲜有研究对水资源与农业种植系统耦合协调发展进行评价，从而助于衡量提高农业产业结构对水资源适配性的定量距离及发展平衡点。罗巍等[10]对水-能源-粮食复合系统的协同发展趋势进行探讨，明确水资源在复合系统中的约束性和重要性。李鸿飞等[11]、赵胡兰等[12]同样运用耦合协调的方法从生态环境、旅游发展等角度丰富了干旱区内复合系统耦合协调研究。

随着我国农业产业高质量发展目标的提出，新疆复合系统的耦合协调性亟需深入考虑，以此来充分发挥新疆资源禀赋的竞争优势，深入探寻地区农业发展差异性。根据2005—2019年新疆水资源与农业种植发展的相关数据，以棉花和粮食种植为例，采用耦合协调度模型和探索性空间数据分析复合系统耦合协调度的时间演化规律和空间集聚特征，为新疆水资源可持续利用与农业种植系统产业的良性协调发展提供重要的理论参考。

1 研究区概况

新疆地处内陆，生态环境脆弱，水资源总量仅占全国3%，是我国干旱区主体。现有的14个地州市具有“三山夹两盆”的地理特征，以天山山脉为界可分为北疆与南疆。南疆幅员辽阔但自然条件较恶劣，资源禀赋严重短缺；北疆可利用土地面积占全疆八成以上，农业生产发展较为领先[13]。现阶段全疆仍面临过度开发、水土流失引发的水安全问题及资源约束、技术不足致使的农业种植问题。因此，对新疆水资源分布及农业种植格局展开两系统协调发展研究，并对南北疆区域差异进行分析，利于实现新疆自然资源与农业产业的可持续发展。

2 数据与方法

2.1 指标选取与数据来源

一般来说，测算地区水资源系统与农业产业系统的耦合协调性，首先需要对两子系统的综合发展水平（指数）进行评价，以判断两子系统的基本发展趋势，从而确定复合系统的耦合协调度。新疆属于干旱缺水地区，复合系统之间具有动态耦合关系[14]，水资源是维持农产品种植产业必不可少的基础要素，尤其是农业节水灌溉技术对农业产出尤为重要；此外，农业种植过程中产生的水量与水质问题对水资源的有效开发和可持续利用都形成了一定的阻碍。基于复合系统的耦合关系和新疆地区水资源特征，根据科学性、系统性和数据可获得性等原则，结合相关文献[15-17]构建复合系统的耦合协调综合评价指标体系（表1）。选取2005—2019年新疆14个地州市水资源和农业相关数据作为材料，数据均来源于2006—2020年《新疆统计年鉴》。仅少数缺失数据根据历年数值拟合得出，如2018—2019年生活用水占比及有效灌溉面积，主要数据可由统计年鉴直接获取或推算得出。综合评价指标体系中正属性越大或负属性越小，则对复合系统的发展越有益。

2.2 模型构建

2.2.1 熵值法 确定权重的方法较多，其中熵值法适用性较广，参照文献[11]以该方法确定各指标权重。首先，采用极值法消除各指标量纲差异。

$$\begin{cases} r_{tij} = \dfrac{x_{tij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}, & \text{正向指标} \\ r_{tij} = \dfrac{\max(x_j) - x_{tij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}, & \text{负向指标} \end{cases} \tag{1}$$

式中：r_{tij}为t年i地区j指标中x_{tij}的无量纲化数值，$r_{tij} \in [0, 1]$；$\max(x_j)$、$\min(x_j)$分别为指标j的最大、最小值。

其次，计算指标的信息熵（e_j），根据信息熵推导出该指标的熵权（w_j）。

$$e_j = -b\sum_{t=1}^{\theta}\sum_{i=1}^{m}\frac{r_{tij}}{\sum_{t=1}^{\theta}\sum_{i=1}^{m}r_{tij}}\ln\left(\frac{r_{tij}}{\sum_{t=1}^{\theta}\sum_{i=1}^{m}r_{tij}}\right) \tag{2}$$

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-e_j)} \tag{3}$$

式中：θ为总年份数；m为总地区数；n为指标个数；常数$b=1/\ln(\theta m)$，且$b>0$。

2.2.2 综合发展指数 水资源（T_1）、农业种植（T_2）及复合（T）系统的综合发展指数由指标的标准化值和权重计算得出。

$$T_i = \sum_{j=1}^{n} w_j r_{tij} \tag{4}$$

表1　复合系统的耦合协调综合评价指标体系

Tab. 1　Coupling coordination comprehensive evaluation index system of composite system

子系统	一级指标	二级指标	数据来源	属性	权重
水资源	水资源禀赋	人均水资源量/m^3	统计年鉴获取	+	0.13
		人均用水量/m^3	统计年鉴获取	−	0.09
	水资源利用	第一产业用水占比/%	第一产业用水量/总用水量	−	0.12
		生活用水占比/%	生活用水量/总用水量	+	0.10
		生态环境用水占比/%	生态环境用水量/总用水量	+	0.11
		万元GDP用水量/$m^3\cdot(10^4元)^{-1}$	地区GDP/总用水量	−	0.12
		地下水供水占比/%	地下水供水量/总用水量	−	0.11
		中水利用量/$10^9\ m^3$	统计年鉴获取	+	0.09
		水资源开发利用率/%	总用水量/水资源总量	−	0.12
农业种植	种植投入	第一产业固定资产投资/10^4元	统计年鉴获取	+	0.10
		化肥施用强度/$t\cdot hm^{-2}$	化肥施用量/耕地面积	−	0.10
		劳均农作物播种面积/$hm^2\cdot$人$^{-1}$	农作物播种面积/农业从业人员数	+	0.12
		农业机械化水平/$kW\cdot hm^{-2}$	农业机械化总动力/耕地面积	+	0.11
		有效灌溉面积/$10^3\ hm^2$	统计年鉴获取	+	0.12
		水土流失治理面积/$10^3\ hm^2$	统计年鉴获取	+	0.09
	种植产出	劳均农业总产值/10^4元$\cdot$人$^{-1}$	农业总产值/农业从业人员数	+	0.13
		单位面积粮食产量/$kg\cdot hm^{-2}$	统计年鉴获取	+	0.13
		单位面积棉花产量/$kg\cdot hm^{-2}$	统计年鉴获取	+	0.11

注："+"表示正向指标；"−"表示负向指标。

$$T=\lambda T_1+\mu T_2 \tag{5}$$

式中：T_i为子系统的综合发展指数；λ、μ分别为水资源、农业种植系统对地区发展的重要程度，由于两子系统具有同等重要性，故取$\lambda=\mu=1/2$。

2.2.3　耦合协调度模型　"耦合"一词来源于物理学概念，指不同系统之间彼此影响的现象。"耦合协调"是对"耦合"概念的延伸，表示不同系统的和谐有序发展，强调不同系统之间的良性相互作用，耦合协调度是对此种良性作用的度量[18]。复合系统耦合协调度反映了水资源与农业种植两子系统的耦合协调状态，其构建方式如下：

$$D=\left[\frac{2\sqrt{L(1)L(2)}}{L(1)+L(2)}\times T\right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

式中：D为耦合协调度，取值范围为[0, 1]。

依据耦合协调度的大小可对复合系统耦合协调度所处的协调适配阶段进行判断(表2)[19]。

表2　协调适配阶段判别标准

Tab. 2　Discriminatory criteria of coordinated adaptation stage

协调程度	耦合协调度(D)	协调适配阶段
失调衰退区间	[0.0, 0.1]	极度失调衰退
	(0.1, 0.2]	严重失调衰退
	(0.2, 0.3]	中度失调衰退
	(0.3, 0.4]	轻度失调衰退
协调过渡区间	(0.4, 0.5]	濒临失调衰退
	(0.5, 0.6]	勉强协调发展
协调发展区间	(0.6, 0.7]	初级协调发展
	(0.7, 0.8]	中级协调发展
	(0.8, 0.9]	良好协调发展
	(0.9, 1.0]	优质协调发展

2.2.4　探索性空间数据分析　探索性空间数据分析能够对数据的集聚或随机分布状态进行分析[20]，研究利用该方法中的全局及局部空间自相关对新疆14个地州市复合系统耦合协调度的空间关联性和集聚程度进行实证检验。全局空间自相关常用全局莫兰指数(Moran's I)进行测度：

$$\text{Moran's } I=\frac{m\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}w_{ik}(x_i-\bar{x})(x_k-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}w_{ik}\sum_{i=1}^{m}(x_i-\bar{x})^2} \tag{7}$$

式中：x_i、x_k分别为地区i、k的属性值；$\bar{x}$为各样本均值；w_{ik}为空间权重，表示地区间的相互影响程度。

局部空间自相关一般采用局部Moran's I及Moran散点图、LISA聚类图进行分析。Moran散点图有4个象限，其中第一(三)象限为"高-高"("低-低")

象限，表示地区间关系为高（低）值集聚的正向相关；第二、四象限分别为“低-高”与“高-低”象限，均表示地区间关系呈现负相关倾向。LISA聚类图可将各地区与邻近地区间的相关性性质进行可视化展示。局部Moran's $I(I_i)$：

$$I_i = \frac{m(x_i-\bar{x})\sum_{k=1}^{m} w_{ik}(x_k-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{m}(x_i-\bar{x})^2} \tag{8}$$

对于式(7)与(8)中w_{ik}的设置，本研究采用常用的逆距离权重表示：

$$w_{ik} = \begin{cases} \dfrac{1}{d_{ik}}, & i \neq k \\ 0, & i = k \end{cases} \tag{9}$$

式中：d_{ik}为地区i、k间的空间距离。

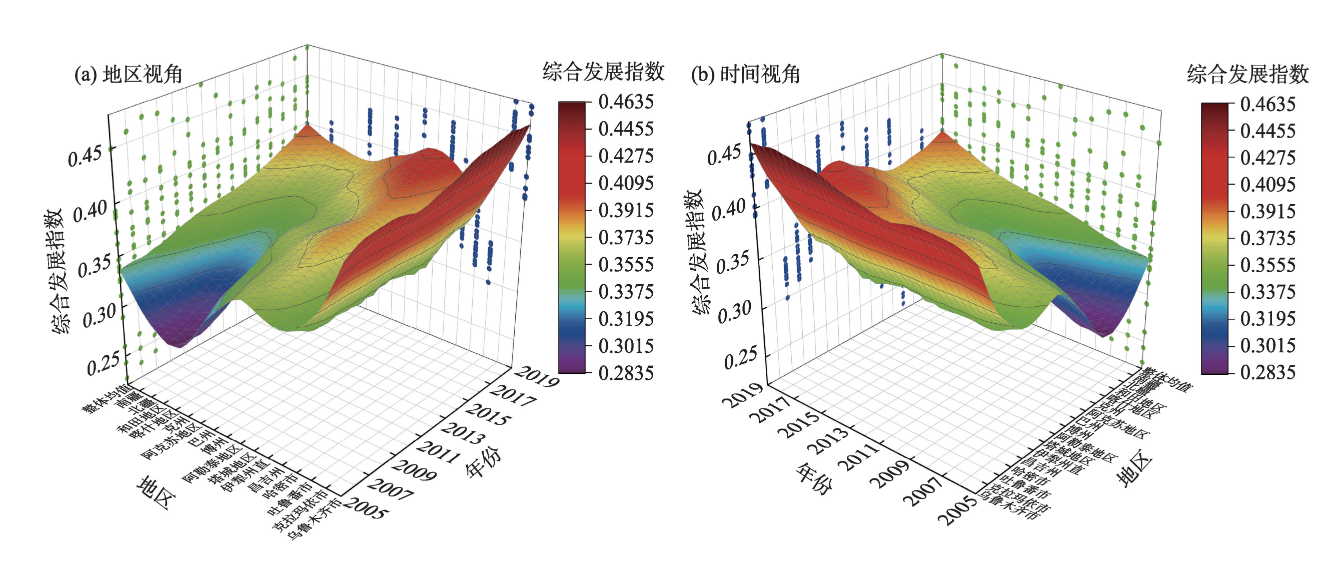
3 结果与分析

3.1 综合发展指数分析

3.1.1 水资源、农业种植系统综合发展指数 新疆各地州水资源系统综合发展指数存在时间上差异逐渐缩小、空间上“北高南低”的发展特征（图1）。2005—2019年新疆水资源系统的综合发展指数增长较慢，由0.336增长到0.399，增幅为18.75%。2011年之前南北疆综合发展指数存在较大差距，随后逐渐缩小。北疆水资源系统发展总体相对缓慢，综合发展指数由0.362增长到0.408，增幅为12.71%。但北疆中克拉玛依市和乌鲁木齐市的综合发展指数在2005—2019年一直位于新疆前列。南疆水资源系统综合发展指数由0.290增长到0.383，增幅达32.07%。其中，和田地区与喀什地区的综合发展指数增幅虽然最大，分别达到52.68%和54.19%，但依然低于总体平均值。吐鲁番市与阿克苏地区水资源系统综合发展指数长期位于新疆末列。

此外，新疆农业种植系统的综合发展指数均值相对较低但增长趋势较快，由2005年的0.266提升至2019年的0.351，增幅达31.95%。南北疆农业种植系统的综合发展指数总体差异较小，但14个地州市间指数差异较大，极值差在2005—2014年接近0.120，在2015—2019年接近0.145（图2）。克拉玛依市与伊犁州直是新疆农业种植系统综合发展状态最好的地区，2019年这两地的综合发展指数均超过0.4，2005—2019年两地综合发展指数的增幅最高。克州、吐鲁番市与哈密市的农业种植系统综合发展状态较差，指数均低于0.3且增幅最低。

3.1.2 复合系统综合发展指数 新疆复合系统的综合发展指数由2005年的0.301增长到2019年的0.375，增幅为24.64%，各地州市复合系统综合发展指数大致可分为4个梯队，伊犁州直、克拉玛依市和



注：昌吉州为昌吉回族自治州；伊犁州直为伊犁哈萨克自治州直属县市；博州为博尔塔拉蒙古自治州；巴州为巴音郭楞蒙古自治州；克州为克孜勒苏柯尔克孜自治州。北疆包括乌鲁木齐市、克拉玛依市、吐鲁番市、哈密市、昌吉州、伊犁州直、塔城地区、阿勒泰地区、博州；南疆包括巴州、阿克苏地区、克州、喀什地区、和田地区。下同。

图1 水资源系统综合发展指数变化趋势

Fig. 1 Trend of comprehensive development index of water resources system

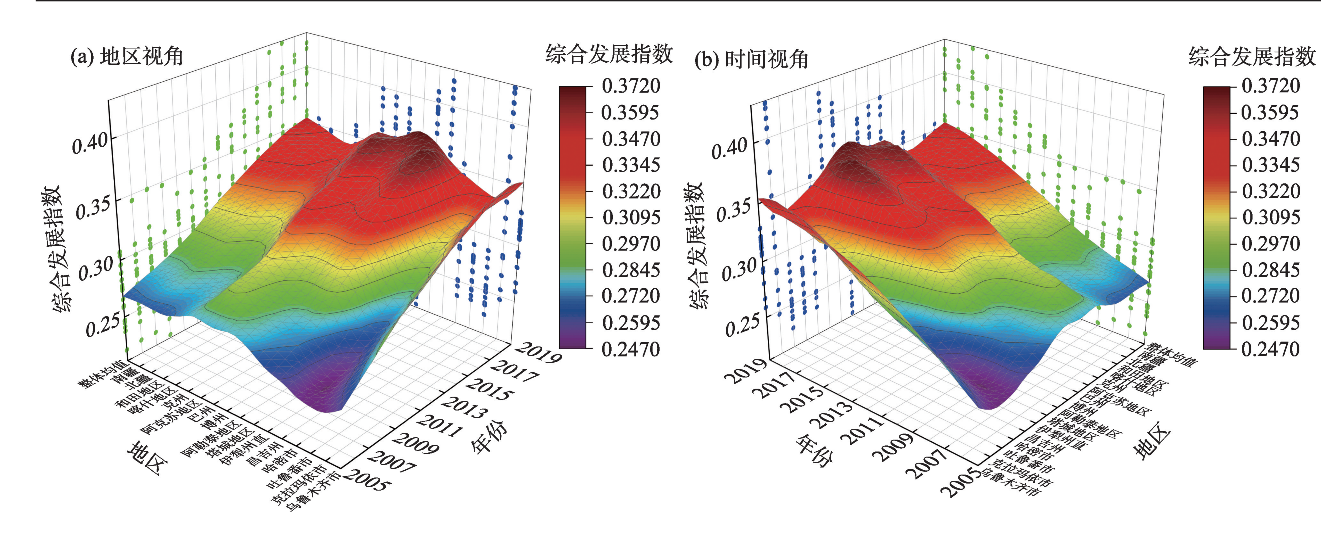


图2　农业种植系统综合发展指数变化趋势

Fig. 2　Trend of comprehensive development index of agriculture cropping system

巴州为综合发展状态最好的第一梯队，2019年该复合系统综合发展指数分别达到0.432、0.427和0.414，远超新疆其他地州；乌鲁木齐市、塔城地区、昌吉州和博州处于第二梯队，均有1个及以上综合发展状态较好的子系统支撑；阿勒泰地区、阿克苏地区、克州、喀什地区、和田地区处于第三梯队，地区水资源及农业种植系统均存在发展劣势；哈密市和吐鲁番市的粮食和棉花种植系统综合发展指数在2019年分别为0.307、0.322，属于综合发展状态较差的地州(图3)。其中，第一、二梯队地州市位于新疆地理空间中部位置，因而复合系统综合发展指数表现出“中轴高，两翼低”的特征。

3.2　耦合协调度及其时空演变

3.2.1　复合系统耦合协调度的时空特征　2005—2019年新疆复合系统整体耦合协调度由0.544上升到0.610，增幅为12.07%，涉及到2个耦合协调发展阶段，2015年前处于协调过渡区间的勉强协调发展阶段，于2016年首次进入协调发展区间的初级协调发展阶段。新疆各地州市复合系统的耦合协调度均表现为波动上升，北疆由0.552上升到0.612，南疆由0.529上升到0.606，总体呈“北高南低”的空间演化特征(图4)。一方面，复合系统耦合协调水平的提升与各子系统综合发展指数逐年增加相关，南疆水资源系统的发展速度快于北疆，并且其水资源系

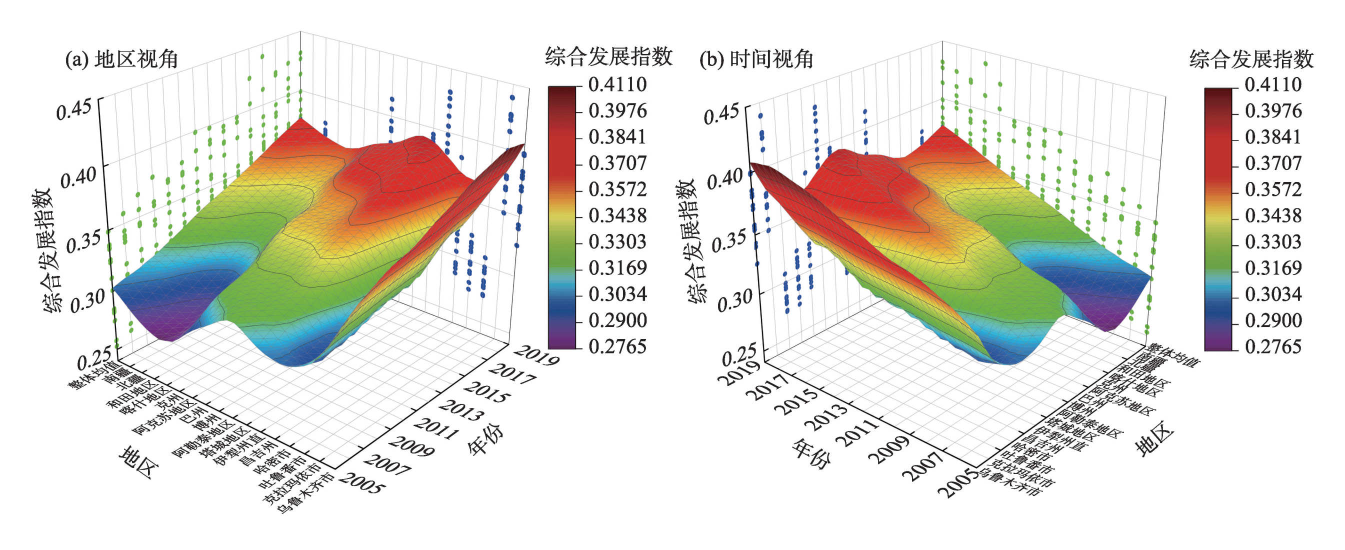


图3　复合系统综合发展指数变化趋势

Fig. 3　Trend of comprehensive development index of composite system

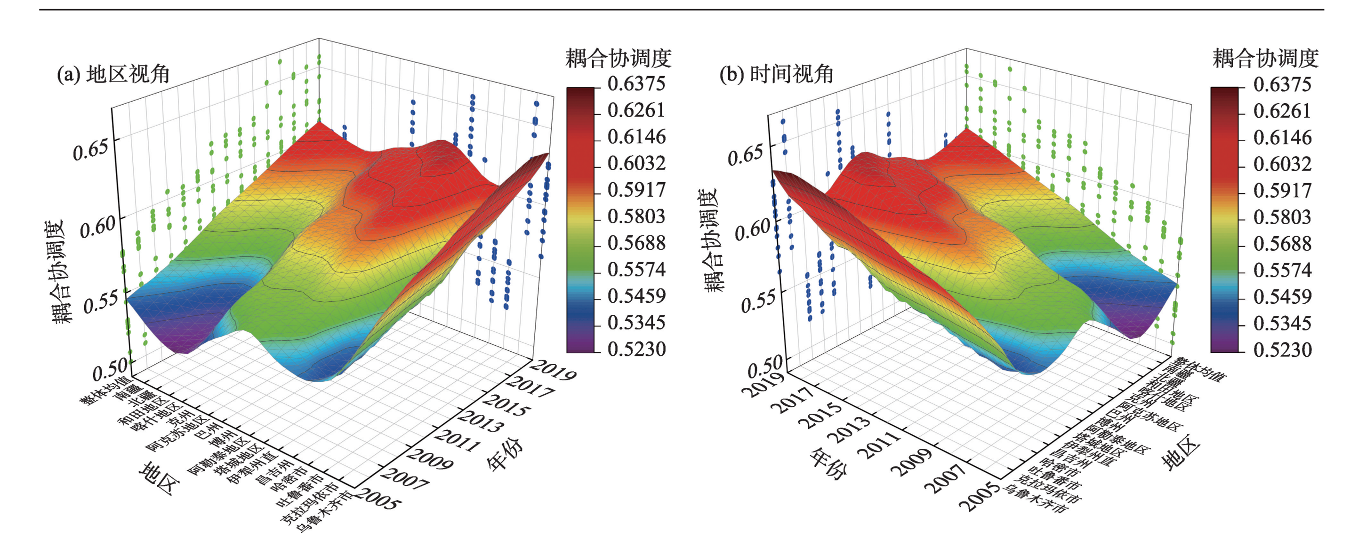


图4 复合系统耦合协调度变化趋势

Fig. 4 Trend of the coupling coordination degree of composite system

统相对处于较高水平，致使南北疆复合系统耦合协调度不断增长且差距逐年减小；另一方面，由于水资源系统综合发展水平优于农业种植系统且北疆更具优势，且农业种植系统的综合发展协调性在各地州市间因时空差异较大逐渐成为阻碍复合系统耦合协调发展的短板，致使水资源系统在耦合协调中占据主导地位且致使南北疆耦合协调水平表现为"北高南低"的态势。从时空分布来看，2005—2007年，各地州的耦合协调度均低于0.6，处于勉强协调发展阶段，其中喀什地区与和田地区的耦合协调度最低。2008年克拉玛依市的耦合协调度先达到0.6，进入初级协调发展阶段，随后2009—2019年巴州、乌鲁木齐市、伊犁州直、塔城地区、博州、昌吉州与阿克苏地区也相继进入该阶段，其中克拉玛依市和伊犁州直的耦合协调度在2019年均超过0.65，是最接近中级协调发展阶段的地区。吐鲁番市与哈密市的耦合协调度一直处于较低水平，2019年分别为0.553和0.564，与其他地区相比差距明显。

3.2.2 全局空间关联性 2005—2019年新疆复合系统耦合协调度的全局Moran's *I* 由2005年的0.419波动下降到2019年的0.311，且显著性水平 *P* 均小于0.05（表3），说明新疆各地州市间复合系统耦合协调互动效应较强，且存在显著的空间正相关集聚特征，但其空间依赖性则表现出由强减弱的变化态势，即耦合协调度高的地区在空间上趋于相邻，耦合协调度低的地区在空间上也趋于相邻。这说明，新疆复合系统整体耦合协调水平呈现逐年提升的态势，但其内部各地州间的交互效应逐渐薄弱，即地区间更多倾向于自主发展而降低周围地州对自身发展的影响。

表3 2005—2019年复合系统耦合协调度的全局Moran's *I*

Tab. 3 Global Moran's *I* of the coupling coordination degree of composite system from 2005 to 2019

年份	Moran's *I*	*P*值	*Z*值	sd
2005	0.419	0.010	2.894	0.173
2006	0.348	0.018	2.471	0.173
2007	0.288	0.031	1.971	0.171
2008	0.235	0.032	1.977	0.169
2009	0.280	0.030	2.127	0.171
2010	0.257	0.032	1.997	0.171
2011	0.334	0.016	2.465	0.169
2012	0.258	0.040	2.030	0.167
2013	0.236	0.040	1.973	0.163
2014	0.312	0.018	2.362	0.165
2015	0.300	0.022	2.365	0.161
2016	0.287	0.020	2.301	0.160
2017	0.326	0.018	2.461	0.165
2018	0.322	0.023	2.102	0.166
2019	0.311	0.016	2.357	0.165

注：*P*值为估计概率；*Z*值为*Z*检验的统计量；sd为标准误。

3.2.3 局部空间关联模式 2005、2010、2015年和2019年的Moran散点图中拟合趋势线斜率均为正，复合系统耦合协调度在空间上存在集聚现象，但各个年份的集聚特征存在一定差异。2005年的Moran散点图中位于第一至三象限的点均占比28.57%，各地州复合系统耦合协调度在空间上表现出的集聚

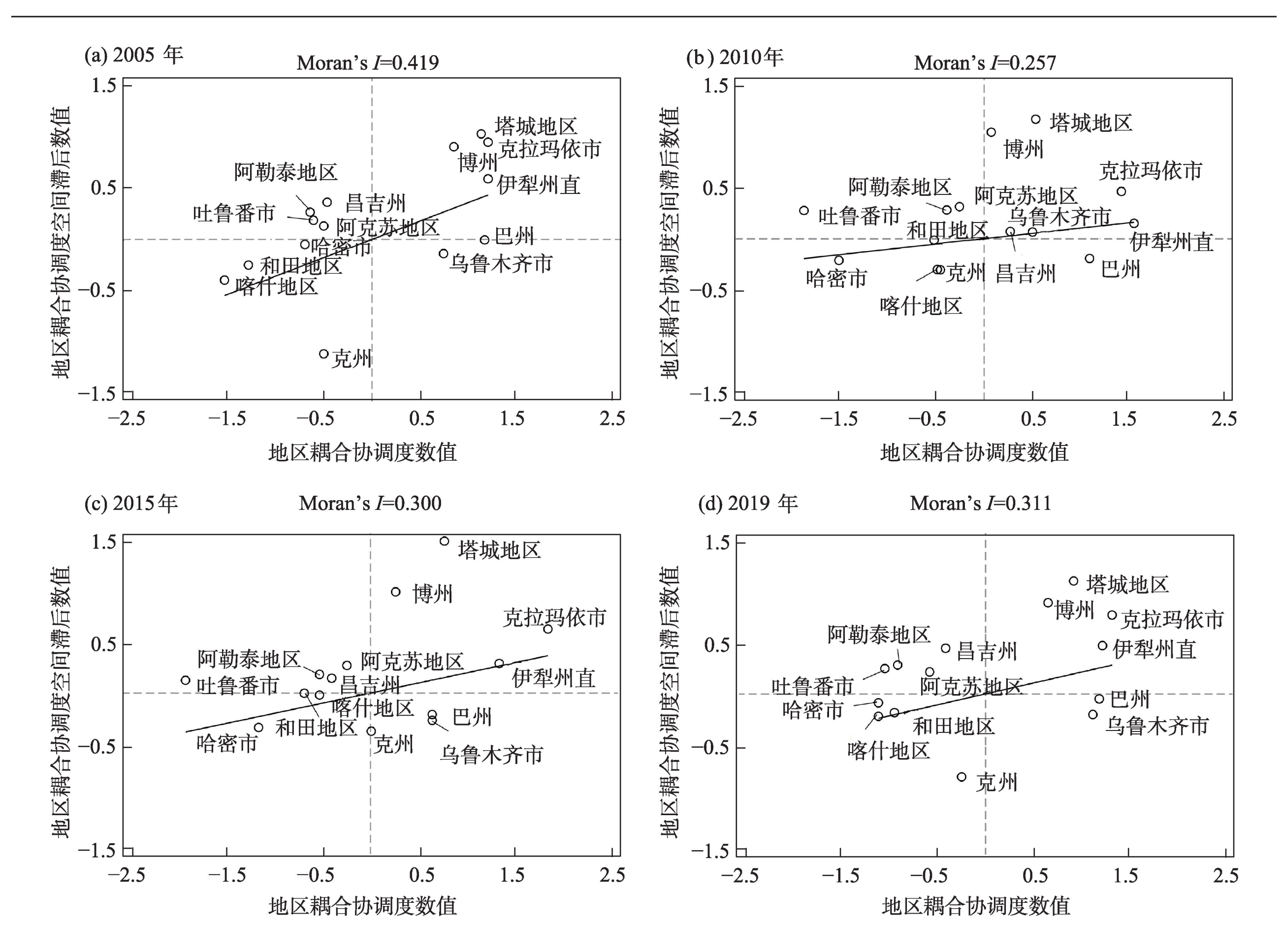


图5　2005—2019年复合系统耦合协调度的Moran散点图

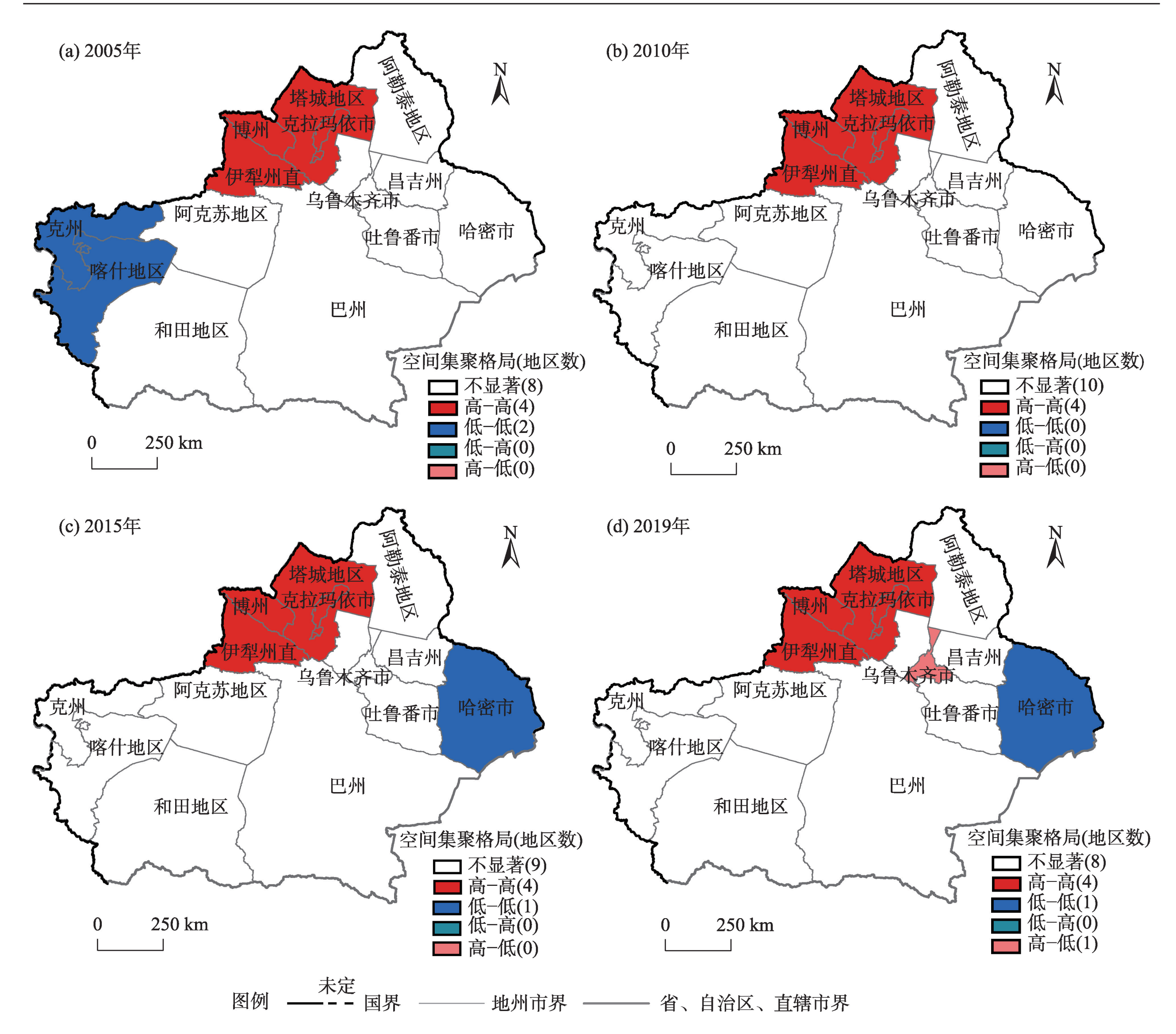
Fig. 5　Moran scatter plot of the coupling coordination degree of composite systems from 2005 to 2019

状态较为分化(图5a);2010年"高-高"集聚现象情况增加,邻近地州间的同质发展状态逐渐蔓延,主要特征演变为复合系统耦合协调度较高的地区趋于与邻近同样较高的地区相连(图5b);2015年"低-低"集聚现象情况降低,位于第二象限的散点逐渐增加(图5c);2019年集聚状态与2005年相近(图5d)。

此外,在0.05的显著性条件下,2005—2019年新疆复合系统耦合协调度的空间集聚格局在不断变化。2005年"高-高"型地区包括塔城地区、克拉玛依市、博州和伊犁州直,"低-低"型地州包括克州和喀什地区,其他地州集聚类型均不显著(图6a);2010年仅存在"高-高"型地州,于2005年基础上克州和喀什地区转为不显著地州(图6b);2015年"高-高"型地州保持不变,哈密市转变为"低-低"型地州(图6c);2019年乌鲁木齐市转变为"高-低"型,其他地州集聚类型与2015年相同(图6d)。从时空演化趋势来看,塔城、克拉玛依市、博州和伊犁州直易与邻近地州形成高值集聚块,呈现地区间复合系统耦合协调度同质向高发展趋向;哈密市与其邻近地州易形成耦合协调度皆低的空间关联倾向;"高-高"型地区仅存在于北疆部分地区,南疆复合系统耦合协调度较高的地州对邻近地州的辐射作用不足。

4　讨 论

克拉玛依市复合系统耦合协调度表现为较高水平,其农业用水比例较低但水资源开发利用率较高,考虑到水资源可持续发展,建议该地区在改善灌溉配套设施后仍需合理调控用水量,保证复合系统的协调性发展[1]。乌鲁木齐市农业机械强度及有效灌溉面积比例等适配性发展条件水平较低,致使其劳均产出及单位面积产量水平不高,阻碍了复合系统耦合协调度提升,因而建议该市进一步加强农田水利设施建设,以保证复合系统的良性发展[18-19]。塔城地区、昌吉州、阿克苏地区等复合系统耦合协调度处于新疆中等水平,其中用水结构中农业用水



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作,底图边界无修改。

图6 2005—2019年复合系统耦合协调度的LISA聚类图

Fig. 6 LISA clustering map of the coupling coordination degree of composite systems from 2005 to 2019

占比几乎超过了80%[21],加大农业现代化生产要素的投入,改善农业节水灌溉方式,提高农业用水效率,对于该地区复合系统耦合协调发展具有重要保障作用[15]。哈密市和吐鲁番市等地区复合系统耦合协调度较低,面临较大的协调性发展问题,因此加强地方政府的政策引导,逐步优化升级农业产业结构,推进农业集约化生产,降低农业生产成本,降低用水比例,提高用水效果,是促进地区复合系统耦合协调的关键[3]。

复合系统耦合协调发展与众多要素有关,当水资源与农业种植间相互负向影响降到最低时,两者的耦合协调阶段才能达到最优状态[11]。复合系统耦合协调度较高的地区应发挥自身辐射作用,尤其是南疆各地州,可从经验借鉴、知识技术的分享等角度帮助邻近地区增强复合系统的协调适配性。囿于数据可获得性的限制,本研究选取的指标虽具代表性,但在全面性方面还存在不足,后续研究可基于此评价指标体系再进行改进。

5 结 论

以棉花和粮食种植系统为例,运用熵权法、耦合协调度模型和探索性空间数据分析对2005—2019年新疆复合系统耦合协调发展的时间演化规律和空间集聚特征展开研究。主要结论如下:

（1）新疆复合系统综合发展指数在空间上表现出“中轴高，两翼低”的特征，其中水资源系统整体水平相对较高，农业种植系统增长趋势更快。新疆复合系统综合发展指数均值均未超过0.4，整体处于较低水平，各地州两子系统的综合发展状态存在一定差异。其中，水资源系统综合发展指数的时空差异较大，综合发展指数最高与最低的地州在研究时段范围长期相差0.12以上，呈现“北高南低”的空间特征。

（2）2005—2019年新疆复合系统耦合协调水平总体逐渐增长并于2016年首次跨入协调发展区间达到初级协调发展阶段，呈现出“北高南低，但差距逐渐缩小”的发展趋势。新疆复合系统耦合协调度在2005—2019年间由0.544波动上升至0.610，南疆较北疆表现出更快的增长趋势。其中，农业种植系统的综合发展协调性在各地州市间的时空差异较大，逐渐成为阻碍复合系统耦合协调发展的短板，且耦合协调相对好的地区对其邻近地区的辐射能力也十分薄弱，然而随着水资源条件日益改善，其与农业种植系统的耦合协调水平于南北疆之间的差距将逐渐缩小。此外，北疆的吐鲁番市与哈密市在复合系统的协调适配性上存在滞后性。

（3）新疆复合系统耦合协调度存在由强减弱的空间正相关集聚特征。其中，空间集聚类型主要以“高-高、低-低”集聚为主，复合系统耦合协调度呈现出明显的溢出效应，易受邻近地区的空间影响。在局部特征上，邻近地区以同质发展状态为主，南疆地区耦合协调度较高的地区表现出的正向辐射作用不足。这就亟需调节和扩大相关邻近地区的资源禀赋共享与数字化信息技术的农业产业推广政策，以求达到新疆复合系统的耦合协调。

参考文献（References）

[1] 雒新萍, 刘晓洁. 中国典型农作物需水量及生产水足迹区域差异[J]. 节水灌溉, 2020(1): 88−93. [Luo Xinping, Liu Xiaojie. Regional differences on typical crop water requirement and water footprint in China from a production perspective[J]. Water Saving Irrigation, 2020(1): 88−93.]

[2] 郎婷婷, 郝蒙蒙, 吴风华, 等. 基于DSSAT模型的京津冀地区主要农作物用水分析[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 235−242, 248. [Lang Tingting, Hao Mengmeng, Wu Fenghua, et al. Study on water requirements of major crops in Beijing-Tianjin-Hebei region using DSSAT model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 235−242, 248.]

[3] 金涛. 中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 14−25. [Jin Tao. The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 14−25.]

[4] 张家欣, 邓铭江, 李鹏, 等. 虚拟水流视角下西北地区农业水资源安全格局与调控[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 131−140. [Zhang Jiaxin, Deng Mingjiang, Li Peng, et al. Security pattern and regulation of agricultural water resources in northwest China from the perspective of virtual water flow[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 131−140.]

[5] 吴勇, 张赓, 陈广锋, 等. 中国节水农业成效、形势机遇与展望[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(11): 1−6. [Wu Yong, Zhang Geng, Chen Guangfeng, et al. Achievements, situation and opportunities of water saving agricultural in China and projections for future development[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(11): 1−6.]

[6] 方芳, 马琼. 虚拟水价值视角下新疆主要农作物种植偏好及布局研究[J]. 节水灌溉, 2019, 44(7): 95−100. [Fang Fang, Ma Qiong. Study on planting preference and layout of main crops in Xinjiang from the perspective of virtual water value[J]. Water Saving Irrigation, 2019, 44(7): 95−100.]

[7] 许航, 李韬, 宋健峰. 旱区农业灌溉用水反弹效应及其区域差异——以西北五省（区）为例[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1808−1820. [Xu Hang, Li Tao, Song Jianfeng. Estimation, driving factors, and regional differences of agricultural irrigation water rebound effect in arid areas: Examples of five provinces in northwestern China[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1808−1820.]

[8] 孙才志, 张灿灿, 郜晓雯. 中国“四化”建设对水足迹强度的影响分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4): 767−778. [Sun Caizhi, Zhang Cancan, Gao Xiaowen. Impact of China's "four modernizations" on water footprint intensity[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4): 767−778.]

[9] 杨晶. 乡村振兴战略推进下农业水资源节水激励机制研究[J]. 农业经济, 2020, 40(7): 12−14. [Yang Jing. Study on the incentive mechanism of agricultural water resources saving under the promotion of rural revitalization strategy[J]. Agricultural Economy, 2020, 40(7): 12−14.]

[10] 罗巍, 杨玄酯, 杨永芳, 等. 黄河流域水-能源-粮食纽带关系协同演化及预测[J]. 资源科学, 2022, 44(3): 608−619. [Luo Wei, Yang Xuanzhi, Yang Yongfang, et al. Co-evolution of water-energy-food nexus in the Yellow River Basin and forecast of future development[J]. Resources Science, 2022, 44(3): 608−619.]

[11] 李鸿飞, 何颖茹, 毕晓莉. 黄河流域兰州段生态环境与高质量发展耦合协调关系研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1244−1253. [Li Hongfei, He Yingru, Bi Xiaoli. Coupling coordination relationship between ecological environment and high-quality development in Lanzhou section of Yellow River Basin[J]. Arid Land Ge-

ography, 2022, 45(4): 1244-1253.]

[12] 赵胡兰, 杨兆萍, 韩芳, 等. 新疆旅游产业—经济发展—生态环境耦合态势分析及预测[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1146-1154. [Zhao Hulan, Yang Zhaoping, Han Fang, et al. Analysis and forecast of coupling situation among tourism industry-economic development-ecological environment in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1146-1154.]

[13] 金梦婷, 徐丽萍, 李鹏辉. 南北疆区域经济差异化三维生态足迹自然资本利用的时空演变[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4327-4339. [Jin Mengting, Xu Liping, Li Penghui. Spatial and temporal evolution of natural capital utilization in the three-dimensional ecological footprint under the regional economic differentiation in north and south Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4327-4339.]

[14] D'Odorico P, Davis K F, Rosa L. The global food-energy-water nexus[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(3): 456-531.

[15] 尚杰, 于浩然, 杨旭. 农业用水效率时空差异与影响因素分析[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(3): 11-19. [Shang Jie, Yu Haoran, Yang Xu. Spatial temporal differences and influencing factors of agricultural water use efficiency[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(3): 11-19.]

[16] 刘楚杰, 李晓云, 聂媛. 基于重心模型的粮食生产与水资源时空耦合分析[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(6): 1026-1036. [Liu Chujie, Li Xiaoyun, Nie Yuan. The spatio-temporal coupling analysis of grain production and water resources based on the barycenter model[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(6): 1026-1036.]

[17] 张继红, 刘云鹤, 王全九, 等. 典型作物Logistic模型生长参数空间分布及其地区水热相关性[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 199-209. [Zhang Jihong, Liu Yunhe, Wang Quanjiu, et al. Typical crops' spatial variability of Logistic model parameters and its correlation with regional water and heat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 199-209.]

[18] 赵雪雁, 高志玉, 马艳艳, 等. 2005—2014年中国农村水贫困与农业现代化的时空耦合研究[J]. 地理科学, 2018, 38(5): 717-726. [Zhao Xueyan, Gao Zhiyu, Ma Yanyan, et al. Spatio-temporal coupling between rural water poverty and agricultural modernization in China from 2005 to 2014[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(5): 717-726.]

[19] 屠爽爽, 郑瑜晗, 龙花楼, 等. 乡村发展与重构格局特征及振兴路径——以广西为例[J]. 地理学报, 2020, 75(2): 365-381. [Tu Shuangshuang, Zheng Yuhan, Long Hualou, et al. Spatio-temporal pattern of rural development and restructuring and regional path of rural vitalization in Guangxi, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 75(2): 365-381.]

[20] 田丰, 武建军, 刘雷震, 等. 1901—2015年华北平原干旱时空转移特征及热点区域探测[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(6): 87-96. [Tian Feng, Wu Jianjun, Liu Leizhen, et al. Spatiotemporal transferring characteristics of drought and its hotpots detection in North China Plain during 1901—2015[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(6): 87-96.]

[21] 徐依婷, 穆月英, 侯玲玲. 水资源稀缺性、灌溉技术采用与节水效应[J]. 农业技术经济, 2022, 41(2): 47-61. [Xu Yiting, Mu Yueying, Hou Lingling. Water scarcity, adoption of irrigation technologies and water conservation[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2022, 41(2): 47-61.]

Coupling coordination and spatiotemporal differences between water resources and agriculture cropping system in Xinjiang: A case of grain and cotton cropping systems

ZHANG Ning[1], WANG Zichen[1], YANG Xiao[1], CHEN Tong[2], XING Fei[1]

(1. School of Management, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; 2. Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: This study takes the grain and cotton cropping systems as an example to measure the development level of the water resource and agricultural cropping systems in Xinjiang, China to study its water resource endowment and agriculture industry development, respectively. Additionally, the two systems are combined to further analyze the coupling coordination and spatiotemporal differences of the water resources- agriculture cropping composite system (abbreviated composite system) in Xinjiang. Therefore, data related to water resources and agriculture cropping of 14 prefectures in Xinjiang from 2005 to 2019 were selected to measure the comprehensive development index of water resources, agriculture cropping, and composite systems using the entropy method. On the basis of the comprehensive development index of the composite system, this study further explores the coupling coordination trend and spatiotemporal evolution law of the composite system using the coupling coordination degree model and exploratory spatial data analysis, respectively. The following results are presented. (1) The comprehensive development index of the composite system in Xinjiang is spatially characterized by “high in the middle and low on both sides”. Among them, the level of comprehensive development index of the water resources system is higher than that of the agriculture cropping system and the growth trend of the agricultural plantation system is fast. Comparing the results of the composite development index of water resources and agriculture cropping systems from 2005 to 2019, this study found that the former has been developing at a higher level than the latter during the study period. However, the latter showed a faster growth trend than the former, resulting in a gradual reduction in the gap between the two systems. (2) The overall level of coupling coordination of composite systems in Xinjiang shows a development trend of “high in the north and low in the south, but the gap is gradually decreasing”. Additionally, the agriculture cropping system has gradually become a shortcoming that hinders the development of the coupling coordination of composite systems due to the differences among regions. (3) A significant spatial clustering characteristic of the coupling coordination degree of the composite system is also observed in Xinjiang, but its positive correlation shows a changing trend from strong to weak. The spatial clustering type is mainly “high-high and low-low” clustering, and the coupling coordination degree of the composite system shows spillover effects and is easily influenced by the neighboring areas. The results of this study have theoretical and practical implications for the sustainable use of water resources, the development of the agriculture cropping industry, and the benign coordination of the two in Xinjiang.

Key words: water resources-agriculture cropping composite system; coupling coordination degree; exploratory spatial data analysis; spatiotemporal differences; Xinjiang